

**С. В. КОСТРИКОВ**, д-р геогр. наук, проф., **В. А. БЕРЕЖНИЙ**, асп.

*Харківський національний університет імені В. Н. Каразіна*

## **ДО ПИТАННЯ ПОРОГОВИХ (ГРАНИЧНИХ) СИТУАЦІЙ В ГІДРОЛОГО-ГЕОМОРФОЛОГІЧНІЙ СИСТЕМІ ВОДОЗБОРУ**

Подаються деякі теоретичні підвалини та практична реалізація через програмне забезпечення моделювання граничних геоморфологічних ситуацій в системах водозбірних басейнів. Обговорюється зв'язок системного підходу в геоморфології із концепцією граничних ситуацій. Обґрунтовуються поняття “гідролого-геоморфологічна система водозбору”, “гранична (порогова) геоморфологічна ситуація ” і “чутливість системи водозбору”. Пропонується апарат формалізації опису порогових ситуацій через індексний метод і коефіцієнтні моделі. Подаються дві окремі моделі, кожна із яких відбиває певний коефіцієнт граничної геоморфологічної ситуації. Викладений підхід апробований через побудову геоінформаційної моделі трьох водозбірних площ у верхній частині басейну р. Оскіл. На цій основі змодельоване проходження певної граничної ситуації в системі водозбору.

**Ключові слова:** флювіальна геоморфосистема, геоінформаційна модель, водозбір, гідролого-геоморфологічна система водозбору, гранична геоморфологічна ситуація, відгук водозбору

**Kostrikov P. V., Beregniy V. A.**

### **TO QUESTION OF THRESHOLD (MAXIMUM) SITUATIONS IN HYDROLOGIC-GEOMORPHIC WATERSHED SYSTEM**

This paper represents some theoretical principles and applied software implementation of geomorphic threshold modeling. The paper discusses both the system approach in geomorphology and the geomorphic threshold concept as well as the following base definitions: “hydrologic-geomorphic watershed system”, “geomorphic threshold”, and “watershed sensitivity”. There have been suggested some mathematical tools for geomorphic threshold description. Two separate geomorphic threshold ratio models have been suggested. The approach given has been implemented for three watersheds in the upper part of Oskil-river basin with a GIS-model of this area. The threshold exceeding has been modeled in this way.

**Key words:** fluvial geomorphosystem, geoinformation model, watershed, hydrologic-geomorphic watershed system, geomorphic threshold, watershed response

Костриков С. В., Бережний В. А.

# К ВОПРОСУ ПОРОГОВЫХ (ПРЕДЕЛЬНЫХ) СИТУАЦИЙ В ГИДРОЛОГО-ГЕОМОРФОЛОГИЧЕСКОЙ СИСТЕМЕ ВОДОСБОРА

Предлагаются некоторые теоретические фундаментальные принципы и практическая реализация посредством программного обеспечения моделирования предельных геоморфологических ситуаций в системах водосборных бассейнов. Обсуждается связь системного подхода в геоморфологии с концепцией предельных ситуаций. Обосновываются понятия "гидролого-геоморфологическая система водосбора", "предельная (пороговая) геоморфологическая ситуация" и "чувствительность системы водосбора". Предлагается аппарат формализации описания пороговых ситуаций через индексный метод и коэффициентные модели. Представлены две отдельные модели, каждая из которых предлагает определенный коэффициент предельной геоморфологической ситуации. Изложенный подход апробирован через построение ГИС-модели трех водосборных площадей в верхней части бассейна г. Оскол. На этой основе смоделировано прохождение определенной предельной ситуации в системе водосбора.

**Ключевые слова:** флювиальная геоморфосистема, геоинформационная модель, водосбор, гидролого-геоморфологическая система водосбора, предельная геоморфологическая ситуация, отзыв водосбора

**Вступ до проблеми.** Концепція визначення порогових (граничних) ситуацій течії природних або штучних процесів займає суттєве місце у предметній галузі фізичних та технічних дисциплін. Однак, в науках геолого-географічного циклу, взагалі, та в геоморфології зокрема, приклади відповідного концептуального підходу дотепер були достатньо винятковими та переважно пов'язаними із публікаціями англомовної геоморфологічної школи (J. Bradford, W. Bull, D. Coates, M. Kirkby, W. Langbein, L. Peltier, S. Schumm та інші). З іншого боку, лише кілька публікацій радянських та російських авторів можна розглядати причетними до предметного напрямку *граничних (порогових) геоморфологічних ситуацій (ГГС)*. Це, наприклад, роботи М. І. Маккавєєва [1-3], М. А. Флоренсова [4], Ю. Г. Сімонова [5, 6], О. І. Скоморохова [7] та інші.

Протягом останнього сторіччя, зокрема, починаючи приблизно з 1950-х років, достатньо підходів щодо дослідження стану, функціонування та розвитку *відкритої геоморфологічної системи (ВГС)* ґрунтувалися на концепції, яка так чи інакше приймала до уваги високу ймовірність досягнення або рівноважного стану, або «стану сталої невідновуваності» між формами рельєфу та геоморфологічними процесами при їх взаємодії при перетворенні підстильної поверхні. У цьому відношенні доцільно послатися, наприклад, на наступний змістовний огляд [8].

Деякі із дослідників приймали постулат, згідно якому рівноважний стан у процесах рельєфоутворення має місце тоді, коли механізми саморегуляції ВГС забезпечують та-

ку відповідність серед багатьох змінних, як факторів зовнішнього імпаку на неї, так і внутрішніх чинників її розвитку, при якій перетворення морфології рельєфу майже не відбувається протягом певного часу. Тобто, якщо параметри функціонування, динаміки та розвитку ВГС, відповідно до такої концепції, досягають *стану самовпорядкованості*, тоді відповідний цій системі реальний геоморфологічний об'єкт, наприклад, водозбірний басейн, має досягати певної, незалежної від течії часу, *самовпорядкованої конфігурації*: 1) морфології та морфометрії його поверхні, 2) топологічних, метричних та ангулярних властивостей його мережі рельєфу, 3) однорідності гідрологічного режиму в його межах [9, 10].

Інші автори, як, наприклад, радянські вчені, на яких вже посилалися вище, так і деякі представники англомовної геоморфологічної школи (наприклад [11]), віддавали перевагу дослідженню саме природи процесу перманентних змін у морфології рельєфу земної поверхні – перманентних змін у структурі ВГС – на відміну від дослідження природи досягнення рівноважного стану морфології рельєфу та самовпорядкованої конфігурації ВГС. Подібний підхід, як правило, обґрунтовувався тією обставиною, що стан «рівноважності та впорядкованості рельєфу» є поняттям занадто суб'єктивним, і якщо і може бути досягнутий, то на дуже короткий проміжок часу. На користь такого погляду приводяться достатньо прості міркування. Тектонічні рухи, кліматичні зміни, просторова диференціація у здатності поверхневих відкладень бути еродованими, залежність від

місцеположення щодо техногенного імпаكتу – все це швидше обумовлює саме феномен перманентних змін у географічному ландшафті, а не досягнення стану врівноваженості як його окремих компонентів, так і всього ландшафту у цілому. Так, можна погодитися, що довгострокове пристосування до стану врівноваженості *схиливих підсистем* відкритої геоморфосистеми буде мати своїм наслідком ще більш довше пристосування до відповідного стану *підсистем мережі рельєфу* (*руслених та вододільних*). Однак, з іншого боку, є всі підстави стверджувати, що саме флювіальні підсистеми ВГС (підсистеми мережі рельєфу водозбірної басейну) за певних обставин матимуть виражений тренд у напрямку досягнення принаймні *квазірівноважного стану*, коли для інших складових відкритої геоморфосистеми, наприклад, регіонально окреслених шарів рихлих відкладень або топографічних інверсій, подібного тренду навіть припустити не можна.

Вказаний тренд флювіальних геоморфосистем (ФГМС) є, по-перше, обумовленим об'єктивною необхідністю їхнього взаємного пристосування у географічному просторі, а, по-друге, ускладненнями, які супроводжують таке пристосування, та котрі, в свою чергу, обумовлені саме наявністю граничних геоморфологічних ситуацій та механізмів зворотних зв'язків – і перші, і другі обумовлюють *комплексний гідролого-геоморфологічний відгук водозборів* [12, 13]. При цьому треба приймати до уваги, що саме водозбірні басейни є найбільш важливим типом одиниць морфогенетичного районування земної поверхні у регіонах поширення ерозійно-аккумулятивної морфоскульптури. Принциповою перевагою *водозборів як об'єктів дослідження* ГГС може бути та обставина, що саме водозбірні басейни виступають, як єдине функціональне ціле у той час, коли особливості їх поверхні і процесів, що на ній відбуваються, мають досить різноманітні просторові зміст і подання. При геоінформаційному моделюванні на предмет визначення ГГС, флювіальний характер рельєфу водозбору об'єктивно відображається певною сукупністю ГГС-об'єктів і має бути прийнятим до уваги разом із гідро-

логічним режимом басейну при формалізації опису останнього як об'єкта моделювання. Таким чином, методологічною підставою ГГС-моделювання для визначення порогових геоморфологічних ситуацій доцільно прийняти дослідження *водозбірної організації флювіального рельєфу*. Раніше підкреслювалося [9], що за великим рахунком, доцільно було б чітко розділяти *організаційні й самоорганізаційні* механізми формування флювіального рельєфу й, відповідно, визначати *геоморфологічні системи двох таких типів*. Якщо для геоморфосистем першого типу (*організаційні*) елементарна зв'язаність має впливати, перш за все, з функціональної диференціації й необхідності “зшивання” результатів для вирішення більш загальних функціональних задач, то в другому випадку (*самоорганізаційні*), функціональна визначеність суттєво розмита, спостерігається функціональна взаємозамінність. Це виникає спонтанно, без попередньої регламентації. Функція, як результат у таких геоморфосистемах, є невід'ємною від процесу внутрішніх взаємодій, не підлеглих однозначно результату, та є самоцінною через спрямованість на збереження системної цілісності та низької ентропії. Чисто умоглядно можна припустити, що *зовнішні ГГС* (коли система має реагувати на зовнішній імпакт, наприклад, – на характер землекористування, зміни у кліматі та інше, і таким чином виникає порогова ситуація) мають бути присутні у флювіальних геоморфосистемах першого типу, в той час коли *внутрішні ГГС* (наприклад, необхідність водозбору певного розміру та форми пристосуватися до сусідства із іншими басейнами) – у ФГМС другого типу.

Однак, навіть за умов сучасних методів дослідження й значних обсягів наявної первинної інформації, розподіл на організаційні й самоорганізаційні ФГМС, швидше за все, неможливо зробити хоча б приблизно об'єктивно. Тобто неможливо зробити, так би мовити, ортодоксальний розподіл таких геоморфосистем на два окремі типи структурної геоморфологічної впорядкованості. У такому випадку треба, по-перше, приймати водозбірну організацію флювіального рельєфу лише візуалізованим поданням *гідроло-*

го-геоморфологічної системи водозбору (ГГСВ) – рекурентного квазітелеологічного утворення, якому притаманна певна мета розвитку, у якій, однак, немає керуючого суб'єкту; а по-друге, визначати належність ГГСВ певного басейну до того чи іншого типу геоморфосистем – виключно за обставиною або наявності, або відсутності для цієї системи порогових геоморфологічних ситуацій.

**Ціллю цієї статті** є обговорення фундаментальних для предметної галузі флювіального геоморфогенезу понять, таких як: «порогова (гранична) геоморфологічна ситуація», «гідролого-геоморфологічна система водозбору» та «відгук водозбірної басейну»; доведення певного зв'язку між вказаними поняттями через запровадження новітніх кількісних методів їх оцінки; надання релевантних прикладів ГГС-моделювання порогових ситуацій.

**Гідролого-геоморфологічна система водозбору та граничні ситуації.** Принципова можливість визначення та візуалізації ГГС через геоінформаційне моделювання полягає в існуванні певної методології такого моделювання та візуалізації самої ГГСВ. Подібна методологія була розроблена та подавалася раніше [9, 14]. Зокрема пояснювалося, що ГГС-модель цієї системи є моделлю онтологічної сутності (матеріального об'єкту), природної системи, складові якої поєднуються у просторово-функціональне ціле через *гідролого-геоморфологічний процес*. Під останнім розуміється більш широке тлумачення (в рамках двох предметних галузей – геоморфології й гідрології) процесу флювіального рельєфоутворення. Просторово-функціональне ціле утворюється саме через взаємодію двох вказаних складових цієї системи – флювіального рельєфу і гідрологічного режиму водозбору. Особливості їх відгуку-реакції на зміну характеру і ступеню впливу факторів довкілля мають бути індикаторами стадії розвитку *внутрішньої ГГС*. Дві вказані складові структурно поєднуються у єдине ціле, оскільки морфологічною основою басейну є система взаємосполучених русел постійних і тимчасових водотоків, а також утворених цими водотоками відповідно гідролого-геоморфологічному відгуку водозбору на ме-

теорологічні явища ярів, балок, річкових долин і порожнин. Проходячи стадії розвитку ГГС, гідролого-геоморфологічна система водозбору має підкорятися дії геогенетичного закону Д. В. Рундквіста [15], який щодо цієї системи можна сформулювати наступним чином: фази розвитку різнопорядкових субводозборів у великому басейні можуть слідувати лише в еволюційно й функціонально закріпленій послідовності; кожний субводозбір має повторювати еволюційні етапи всього басейну, але, можливо, з дуже швидким їх проходженням, або з еволюційно закріпленою відсутністю.

Водозбірний басейн як реальний геоморфологічний об'єкт забезпечує об'єктивні критерії для визначення порогових ситуацій у своїй гідролого-геоморфологічній системі в двох наступних аспектах: 1) як в обмеженому цілому на земній поверхні, в якому базові кліматичні показники можуть бути виміряні, а морфологія флювіального рельєфу – однозначно описана, та 2) як в системі, функціонування якої може бути оцінено балансовим методом через “прихід – витрату” воли та енергії. У той же час, та обставина, що певна будова мережі рельєфу водозбору однозначно обумовлена, по-перше, гідравлічною геометрією русел й, по-друге – їх по-вздожніми профілями, дає можливість говорити, що існують об'єктивні критерії визначення та навіть візуалізації як «внутрішніх», так і «зовнішніх ГГС».

Концепція порогових геоморфологічних ситуацій була вперше обґрунтована та отримала подальший розвиток в роботах С. Шумма [12, 16]. Зокрема, цим дослідником визначалися зовнішні та внутрішні ГГС, які вже згадувалися в цій статті вище. Відгук відкритої геоморфосистеми на зовнішній ім-пакт визначався у вказаних публікаціях як *зовнішня гранична ситуація*. Звичайно, така ГГС також існує в рамках геоморфосистеми, однак вона не може бути пройдена (вирішена) без впливу *зовнішніх параметрів* розвитку-функціонування геоморфосистеми. *Внутрішні ГГС* виникають та мають бути пройдені на підставі вже *самоорганізаційних здатностей* геоморфологічної системи. Їх можна визначати на прикладі розвитку схилів (три-

ваций процес вивітрювання, потім – раптова зміна морфології схилу, тобто проходження внутрішньої ГГС), або, як вже визначалося – на прикладі взаємного пристосовування окремих частин мережі рельєфу – субводозборів – в межах великого басейну.

Із наочних загальних прикладів *проходження межі* граничних ситуацій в гідролого-геоморфологічній системі водозбору можна вказати на морфологічні наслідки в рельєфі поверхні водозбору катастрофічної поведінки або розвиток масштабних зсувів на схилах річкової долини.

Вже перший варіант концепції ГГС в редакції С. Шумма був викликом багатьом ортодоксальним геоморфологічним підходам, оскільки передбачав можливість змін в морфології рельєфу *без змін зовнішнього імпаку*, тобто фактично припускав імовірність існування самоорганізаційної геоморфосистеми, такої, як, наприклад, зазначена вище ГГСВ. Подібний підхід відразу мав неабияке прикладне значення, оскільки припускав можливість раптового розвитку, наприклад, катастрофічної ерозії на водозборі за умови попереднього достатньо тривалого функціонування системи водозбірного басейну в умовах звичайного зовнішнього впливу.

Дещо пізніше за роботи С. Шумма були опубліковані більш повні класифікації ГГС, які окрім розподілу граничних геоморфологічних ситуацій на зовнішні та внутрішні, також виокремлювали такі ГГС, що стосуються як критичних змін у течії процесу, з одного боку, так і у морфології рельєфу – з іншого; які розподілялися за масштабом ГГС; за фізичними характеристиками явища ГГС; окремо визначалися ГГС, спричинені людиною [17].

На підставі викладеного, вважаємо, що можна дати наступне визначення граничної ситуації в системі водозбору. *Порогова (гранична) геоморфологічна ситуація в гідролого-геоморфологічній системі водозбору є певним часовим репером або проміжком часу, який відокремлює одну від одної дві моди функціонування всієї геоморфосистеми або належної до останньої певної підсистеми.* Концепція граничних ситуацій в геоморфології може певним чином включати у себе

міркування про можливість досягнення ВГС рівноважного стану, або «стану сталої неврівноваженості» (див. вище у статті), однак треба мати на увазі, що часовими реперами, які відокремлюють одну моду (спосіб) функціонування геоморфосистеми від іншої, є саме ГГС, а не «точки або періоди врівноваженості». Останні, безумовно, можуть траплятися, однак, у багатьох випадках – лише як відгук геоморфосистеми на зовнішній імпакт, і більш того – за великим рахунком, з точки зору спостерігача можуть сприйматися як ті ж самі граничні ситуації. Наприклад, коли з певного проміжку часу в зрілому «виробленому» річищі через новітні тектонічні рухи процеси руслової ерозії знову переважають процеси акумуляції, як це було на ранніх стадіях існування русла цього водотоку.

Концепція граничних ситуацій фокусує увагу тільки на тих внутрішніх параметрах геоморфосистеми та її комплексних відгуках на зовнішній імпакт, які можуть змінити саму моду функціонування цієї системи. Можна припустити, якщо концепція геоморфологічної врівноваженості об'єктивно обумовлена існуванням в самоорганізаційній геоморфосистемі механізмів зворотних зв'язків саморегуляції, то джерела концепції ГГС знаходяться в наявності у відкритих геоморфологічних системах першого типу (організаційних) механізмів зворотних зв'язків, так би мовити, «самопосилення». Таким чином, саме методологічний підхід до визначення ГГС може бути доречним при дослідженні, наприклад, аномальних збурень у геоморфосистемах, спричинених варіаціями у антропогенному імпакті на них.

**Коефіцієнтний аналіз для визначення ГГС в гідролого-геоморфологічній системі водозбору.** Індексний метод і побудова простих та агрегатних коефіцієнтів для формалізації характеристик мережі флювіального рельєфу раніше вже обґрунтовувались [18, с. 156-165]. Подібний підхід цілком може бути застосований для визначення порогових ситуацій у ГГСВ. Взавши за основу відому методику коефіцієнтного аналізу як морфології флювіального рельєфу [11], так і феномену флювіального рельєфоутворення, що підпадає під зроблене тут визначення «гідролого-

геоморфологічного процесу» [19], щодо ГГС можна зробити наступні міркування. У разі якщо гранична ситуація відповідає балансовому співвідношенню між двома протилежними трендами гідролого-геоморфологічного процесу, певний пропорційний коефіцієнт подає вказане співвідношення, а в цьому коефіцієнті чисельник, та знаменник відбиватимуть відповідні протилежні тренди.

Доцільно, на нашу думку, ввести таке оціночне поняття як «*коефіцієнт граничної геоморфологічної ситуації*» (КГГС). Частина геоморфосистеми (або система цілком) може бути оцінена як така, що знаходиться або у стані ГГС, або у стані «сталого врівноваженості», якщо КГГС дорівнює одиниці. При такому підході отримуємо низку цікавих можливостей. Наприклад, порогові ситуації (або навіть окремі їх складові) можуть бути порівняні одна із одною. Через *індексний метод* мають бути описані умови проходження даної ГГС і, таким чином, зміни способу функціонування геоморфосистеми; а через *коефіцієнтні моделі* запроваджується алометричний підхід до визначення граничних ситуацій. Останнє можливо з огляду на те, що, так би мовити, «відносна вага» двох або більше компонентів геоморфосистеми саме таким чином використовується для опису порогової ситуації.

Змінні, які використовуються у КГГС, можуть бути простими або складними у залежності від ступеню наближення до реального геоморфологічного об'єкту моделі де використовується такий коефіцієнт. Наприклад, коефіцієнтом порогової ситуації, яка відповідає домінантним рельєфоутворюючим процесам на схилах річкової долини, тобто безпосередньо – в межах ГГСВ, є *КГГС схилового стоку*, який через *коефіцієнтну модель* записується як:

$$0,9 \leq \frac{MF\_пов\_стік}{NF\_інфільтр} \leq 1,1, \quad (1)$$

де *MF\_пов\_стік* – група факторів, яка обумовлює відповідний вказаним умовам поверхневий стік; *NF\_інфільтр* – група факторів, яка обумовлює інфільтрацію на схилах.

Фактично вираз (1) кількісно описує *наближення до ГГС* у інтервалі, на який при-

пускається 0,2, а сама порогова ситуація матиме місце виключно у випадку *КГГС=1*. Розглянемо умови створення ГГС, наприклад, у випадку весняного сніготанення на схилах річкової долини. Двома головними факторами, які збільшують в даному випадку *обсяг* та *інтенсивність стоку*, є інтенсивність сніготанення (залежить, в свою чергу, від величини шару снігового покриву та перепаду температури) та величина похилу. Факторами, які впливають на особливості іншої компонентної складової геоморфосистеми – *інфільтраційної здатності підстильної поверхні* – є її жорсткість, характерна водопроникність, щільність рослинного покриву, локальний індекс вертикального дренажу вологи у ґрунті. Зрозуміло, що у залежності від певного співвідношення «факторної ваги» кожного із двох вказаних компонентів ГГСВ (схилового стоку та інфільтрації), для кожної окремої гідролого-геоморфологічної системи водозбору показник КГГС із (1) буде посідати певне місце у «пороговому інтервалі» 0,9-1,1.

Гранична геоморфологічна ситуація, що описується через (1), відокремлює протилежні домінантні процеси у ГГСВ, однак, з іншого боку, зрозуміло, що протягом лише весняного сніготанення не відбудеться ні радикальних змін у морфології рельєфу поверхні водозбору, ні переходу цієї поверхні у стан «сталого геоморфологічного врівноваженості». Таким чином, оскільки флювіальний рельєф водозбору, як і рельєф земної поверхні взагалі, є відомим своєю консервативністю, в якості індикаційної характеристики *розвитку ГГС у часі* може бути обрана інша складова єдиного гідролого-геоморфологічного процесу – гідрологічний режим водозбору, у першу чергу, ті його параметри, які мають рельєфоутворююче значення.

Для цього через відому методику (наприклад, із [1-3] або із [19]) розраховується транспортуюча здатність руслового потоку, та встановлюється наступний ключовий параметр  $q_s$  – модуль об'ємної твердої витрати ґрунтових фракцій,  $м^3/с \cdot км^2$ . Саме *співвідношення потужності руслового потоку* і його *транспортуючої здатності* описує наявність або відсутність у ГГСВ іншої ГГС, яка

відокремлює спосіб функціонування геоморфосистеми відповідно у стані 1) *русової ерозії*, 2) *аккумуляції* або 3) *рівноваги* між цими процесами. Першим на принципову можливість формалізованого опису такої ГГС вказував В. Бул [11], а якщо тут застосувати методику подання КГГС за аналогією з виразом (1), і зробити запис саме для випадку весняного сніготанення, тоді матимемо (співвідношення чисельника та знаменника приводяться до однакових одиниць):

$$0,9 \leq \frac{q_{MAX}}{q_s} \leq 1,1, \quad (2)$$

де  $q_{MAX}$  – максимальний модуль весняного стоку, л/с  $\cdot$  км<sup>2</sup>.

Показник  $q_{MAX}$  відбиває загальну потужність рідкого поверхневого та руслового стоку у водозборі, та міститься у чисельнику КГГС із (2), оскільки раніше вже доводилося, що в рамках поняття *чутливості гідролого-геоморфологічної системи водозбору* саме тверді витрати у будь-якому замикаючому створі є найбільш чутливі до показнику рідких витрат та похилу русла або схилу [13]. Збільшення  $q_{MAX}$  в (2) сприяє збільшенню твердих витрат, тобто посиленню ерозії, а збільшення знаменника (що обумовлюється більшими твердими витратами, більшим розміром частинок ґрунту, які транспортуються, більшою гідравлічною жорсткістю) обумовлює тенденцію до аккумуляції. Змінні, які формують у чисельнику та знаменнику інтегральні показники  $q_s$  та  $q_{MAX}$  і, відповідно, обумовлюють рух гідролого-геоморфологічної системи водозбору у напрямку одного або іншого тренду даної геоморфосистеми є достатньо численними, однак, щоб до кінця формалізувати, наприклад, необхідну ГІС-модель, і обираються такі узагальнюючі характеристики. Не всі ті змінні, що обумовлюють інтегральні показники із (2), мають емпіричний характер. Наприклад, гідравлічна жорсткість не може бути безпосередньо виміряною у польових умовах. У будь-якому разі, методика оцінки відповідного КГГС згідно (2) представляється більш адекватною, аніж багато традиційних прогнозних розрахунків переважання або руслової та схилової ерозії, або аккумуляції, що виконується на підставі рівнянь, де домінують

факторне значення у більшості випадків має лише величина похилу.

КГГС із (2) відбиває зміни як у домінуючих процесах флювіального рельєфоутворення, так і у морфології рельєфу поверхні водозбору. Причому, періоди «сталого геоморфологічного врівноваження» можуть співпадати із цією пороговою ситуацією у той час, коли загальна потужність поверхневого та руслового рідкого стоку у водозборі дорівнює його транспортуючій здатності, а вираз (2), відповідно, дорівнює одиниці.

Порогова ситуація, яка описується через (2), грає ключову роль у комплексній взаємодії схилових та підсистем флювіальної мережі відкритої геоморфосистеми, вона відбиває прямі та зворотні зв'язки між ними, знаходиться в складній взаємодії із *гідролого-геоморфологічним відгуком водозбору* [20]. Наприклад, емпіричні дані про активізацію руслової ерозії, та, у той саме час, зменшення на відповідному проміжку русла обсягу алювіальних відкладень, свідчать про проходження ГГС у напрямку збільшення чисельника із (2). Розвиток широких алювіальних заплав може свідчити про проходження цієї ГГС у напрямку збільшення знаменника із (2). Створення паралельних одна одній терас вздовж річкової долини може свідчити про наближення ГГСВ до порогової ситуації, яка описується через (2). Зворотні зв'язки ефекту «самопосилення» періодично утримують геоморфосистему водозбору або на «ерозійному», або на «аккумулятивному боці» цієї порогової ситуації.

**ГІС-моделювання ГГС та «чутливість» ГГСВ.** Заключним етапом розгляду виникнення та течії граничних ситуацій у ГГСВ була побудова геоінформаційної моделі певної водозбірної площі та її обробка в авторському програмному забезпеченні *GIS-Module Ukrainian 1.5*. Відповідно, для оцінки ГГС за коефіцієнтними моделями (1) та (2) розраховувався вплив екстремальної повені (0,1% забезпеченості) на місцеположення головного русла та всієї мережі частин трьох водозбірних басейнів – річки Оскілець, верхів'їв р. Оскіл і частини водозбору р. Чуфічівка (рис. 1).

Порівнювалися два змодельованих стани рельєфу і гідрологічного режиму території:

за умов «нормального довкілля», коли обидві коефіцієнтні моделі ((1) і (2)) дорівнюють приблизно одиниці і присутня порогова ситуація «сталості геоморфологічної рівноважності» (*ліве вікно* інтерфейсу); та за умовами наслідку серії екстремальних весняних повеней через підвищення середньої висоти сніжного покриву із звичайних (приблизно 30 см) до 80 см (*праве вікно* інтерфейсу – див. рис. 1). В останньому випадку гранична ситуація у ГГСВ є пройденою, а обидві коефіцієнтні моделі – *MF<sub>пов\_стік</sub> / NF<sub>інфільтр</sub>* та *q<sub>max</sub> / q<sub>s</sub>* – *перевищують 1,1*. Інформаційна стрічка в нижній частині інтерфейсу відповідає положенню курсору на електронній карті і подає відносні координати (*x*, *y*), абсолютну відмітку рельєфу (*z*) і значення порядку (*Rank*) в точці гирла, яке замикає цю флювіальну територію, а *Area* означає розмір водозбірної площі, яка замикається на це гирло. Для ГІС-моделювання проходження ГГС оцінювався вплив на цю територію послідовної серії повеней, яка би мала місце у період, що відповідає часовому лагу повторних спостережень за станом морфології рельєфу та гідрології водозбору в 60 років. За методикою аналізу багаторічних спостережень за сніговим покривом виділялися 5 *пікових років* (1:12), які характеризувалися таненням снігового покриву, що узимку мав відповідну середню висоту в 90, 95, 80, 70 і 65 см. Характерно, що після двох перших, найбільш великих повеней зміни у морфології рельєфу та в гідрологічному режимі були мінімальні, що може бути пояснено успадкованою сталістю гідролого-геоморфологічної системи цих водозборів через відповідний вріз русел і заплавного та прибережного відкладення твердого матеріалу із мулів та глин. Тобто зберігалася порогова ситуація, яка повністю відповідала умовам із (1) та (2). Тільки повені останніх двох років (із висотою снігового покриву в 70 і 65 см) надали остаточних змін у довкілля водозборів (див. рис. 1, праве вікно), і за цих умов стала ГГС була пройдена. Саме проходження граничної ситуації через накопичення кількісних змін у впливі зовнішніх чинників призвело до нового якісного стану геоморфосистеми водозбору. Була змінена “чутливість ГГСВ”, яка імо-

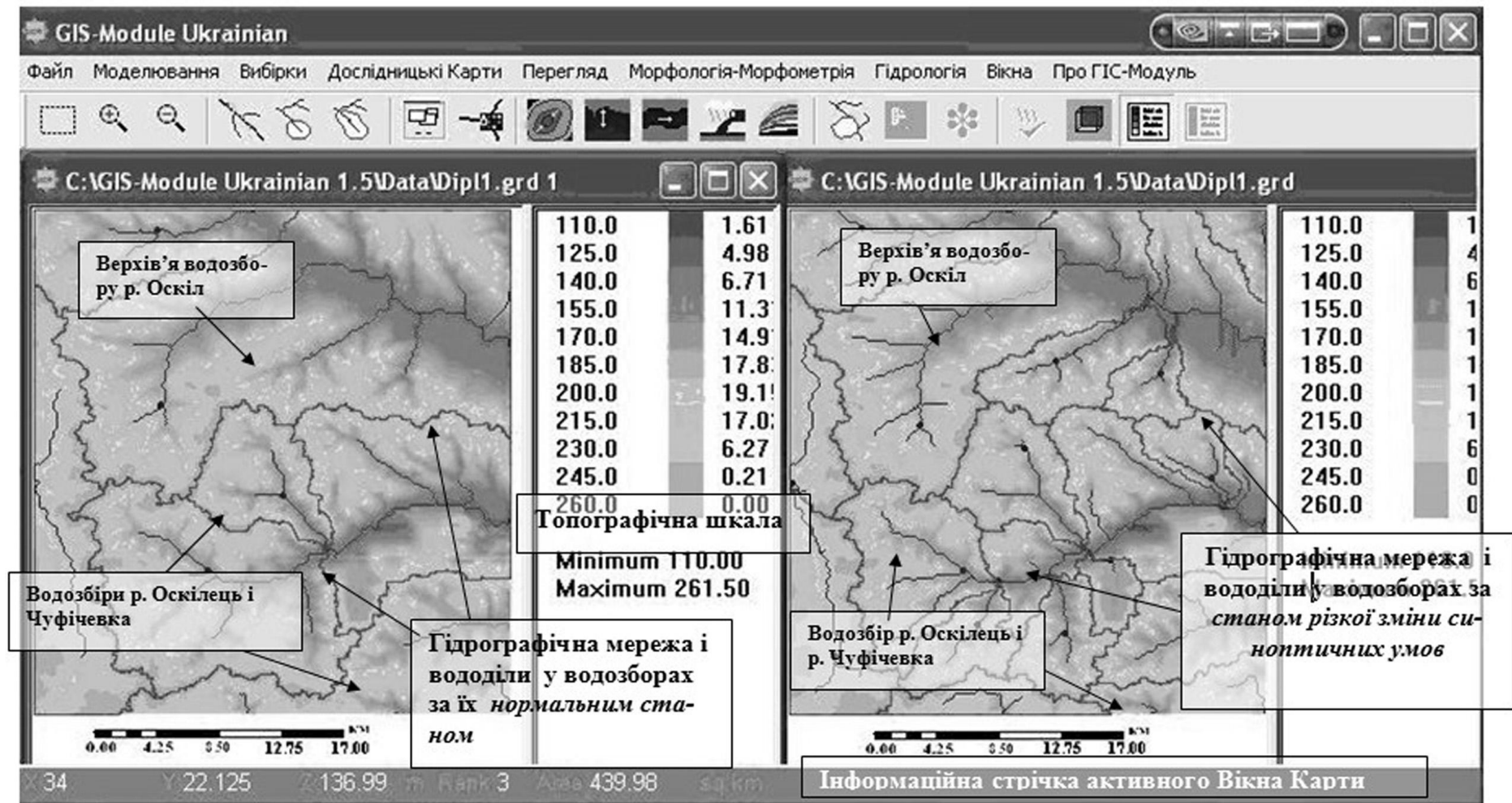
вірно обумовлюється конфігурацією будови, тобто структурними особливостями гідролого-геоморфологічної системи водозбору (рис. 2). Зауважимо, що всі три басейни (Оскільця, верхів’їв Осколу та Чуфічевки) реагують на зовнішній імпульс достатньо синхронно, що пояснюється їх незначним розміром.

**Результати оцінки проходження ГГС, висновки та перспективи.** Ця друга ілюстрація (рис. 2) впливає із результатів ГІС-моделювання (рис. 1) та відбиває зв’язок *нелінійності* відгуку ГГСВ на зміни у довкіллі із особливостями проходження ГГС у даній системі водозбору. Зрозуміло, що стану ГГС відповідає головна діагональ цього *графіка нелінійності відгуку*. У одних випадках можуть мати місце непропорційно великі тверді витрати із водозборів через “надчутливість” їхніх ГГСВ до антропогенних і кліматичних чинників довкілля (*а* – площа графіка *над діагоналлю 1:1*). Незважаючи на те, що у такому разі знаменник коефіцієнтної моделі (2) буде певним чином зростати, результативне значення цього відношення буде *значно вищим за 1,1*, та відбиватиме тренд геоморфосистеми в напрямку пікової руслової та силової ерозії. У іншому випадку – спостерігатиметься протилежна картина (*б* – площа графіка, яка розташована *під діагоналлю 1:1*). «Недостатня чутливість» гідролого-геоморфологічної системи водозбору може імовірно обумовлювати проходження геоморфологічного порогу таким чином, що геоморфосистема розвиватиметься в напрямку тієї моди свого функціонування, яка характеризується помітним переважанням акумуляційних процесів, і, відповідно, коефіцієнтна модель (2) матиме значення *нижче за 0,9*.

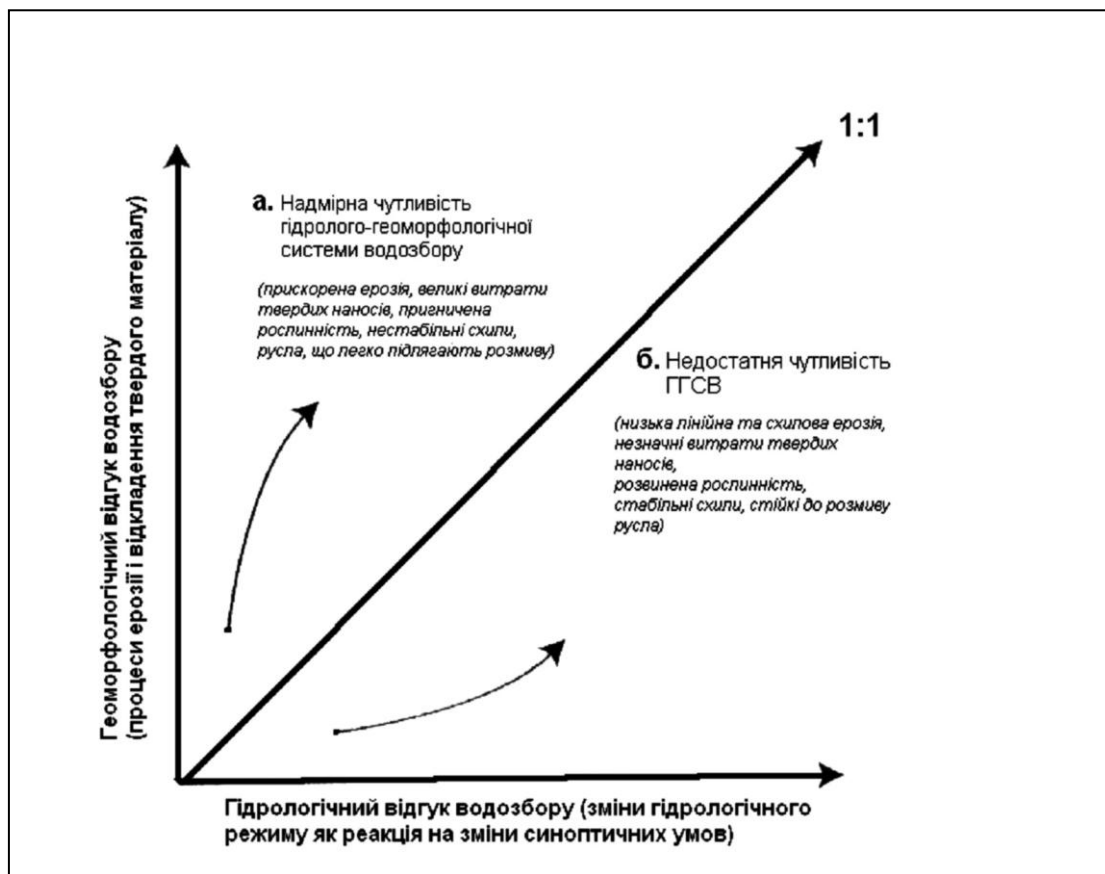
Розуміння як внутрішніх зв’язків у гідролого-геоморфологічній системі водозбірної басейну, так і характеру її відгуків на вплив зовнішніх факторів довкілля, в певному аспекті може бути досягнуте через формалізований опис течії та проходження граничних геоморфологічних ситуацій в рамках цієї системи.

На нашу думку, запропоновані тут коефіцієнтні моделі за умовами подальшого розвитку методики їх калібрування та використання можуть стати достатньо ефективними для менеджменту водозбірних басейнів.





**Рис. 1.** Результати геоінформаційного моделювання проходження граничної ситуації в ГГСВ через зміну у впливі чинників довкілля – синоптичних умов, що призвели до череди зим із збільшенням снігового покриву у 2,7 рази у порівнянні із середніми багаторічними показниками



**Рис. 2.** Зв'язок проходження граничної геоморфологічної ситуації із нелінійністю відгуку водозборів через різну «чутливість» їхніх ГГСВ

## ЛІТЕРАТУРА

1. Маккавеев Н. И. Русло реки и эрозия в ее бассейне / Н. И. Маккавеев. – М.: Изд-во АН СССР, 1955. – 345 с.
2. Маккавеев Н. И. Русловые процессы и их отражение в рельефе / Н. И. Маккавеев. // Современные процессы рельефообразования. – М.: Наука. – 1970. – С. 196-202.
3. Маккавеев Н. И. Сток и русловые процессы / Н. И. Маккавеев. – М.: Изд-во МГУ, 1971. – 115 с.
4. Флоренсов Н. А. Очерки структурной геоморфологии / Н. А. Флоренсов. – М.: Наука. – 1978. – 237 с.
5. Симонов Ю. Г. Анализ геоморфологических систем / Ю. Г. Симонов // Актуальные проблемы теоретической и прикладной геоморфологии. – М.: МФГО. – 1976. – С. 69-92.
6. Симонов Ю. Г. Морфолитогенез областей транзита и аккумуляции рыхлых отложений / Ю. Г. Симонов, Т. Ю. Симонова // Вестн. Моск. ун-та. Сер.5, География. – 2005. – № 4. – С. 3-8.
7. Скоморохов А. И. О двух тенденциях в развитии овражно-балочного рельефа и возможностях противоэрозионной защиты почв / А. И. Скоморохов // Геоморфология. – 1984. – № 1. – С. 103-111.
8. Черванев И. Г. Развитие представлений о саморегулировании и самоорганизации рельефа / И. Г. Черванев, В. А. Боков // Самоорганизация и динамика геоморфосистем: материалы XXVII Пленума Геоморфологической комиссии РАН / отв. ред. А.В. Поздняков. – Томск: Изд-во Ин-та оптики атмосферы СО РАН, 2003 – С. 14-19.
9. Костріков С. В. Гідролого-геоморфологічний підхід до дослідження водозбірної організації флювіального рельєфу / С. В. Костріков // Український географічний журнал. – 2006. – № 3 – С. 46-54.
10. Костріков С. В. Ангулярність флювіального рельєфу, її моделювання та аналіз / Костріков С. В., Черваньов І. Г. // Український географічний журнал. – 2009. – № 1. – С. 8-14.
11. Bull W. D. Allometric change of landforms / W. D. Bull // Geological Society of America Bulletin. – 1985. – Vol. 96. – P. 1489-1498.
12. Schumm S. A. Geomorphic thresholds and complex response of drainage systems / Schumm S. A. // Fluvial geomorphology / ed. Morisawa M. – NY: NY University, Publ. Geomorphol, 1973. – P. 229-310.
13. Костріков С. В. Про деякі особливості зв'язку флювіальних процесів на водозборах із змінами у природно-антропогенному довкіллі / Костріков С. В. // Захист довкілля від антропогенного навантаження. – Харків-Кременчук, 2004. – Вип. 10 (12). – С. 57-69.
14. Костріков С. В. ГІС-моделювання флювіальних геоморфосистем для оцінювання поверхневого стоку

й запобігання ризикам його критичного режиму / С. В. Костріков, І. Г. Черваньов // Просторовий аналіз природних і техногенних ризиків в Україні: збірник наукових праць. – НАНУ: Інститут географії – Київ, 2009 – С. 21-25.

15. *Щербаков А. С.* Самоорганизация материи в неживой природе: Философские аспекты синергетики / Щербаков А. С. – М.: Изд-во Моск.ун-та, 1990. – 111 с.

16. *Schumm S. A.*: Geomorphic thresholds: the concept and its applications / Schumm S. A // Transactions of the Institute of British Geographers. New Series. – 1979. – Vol. 4. – No. 4. – P. 485-515.

17. *Coates D. R.* Perspectives on Geomorphic Thresholds / D. R. Coates, J. D. Vitek // Thresholds in Geomorphology / ed. by D. Coates. – GA&UW: Stroudsburg, 1980. – P. 3-22.

18. *Черваньов І. Г.* Флювіальні геоморфосистеми: дослідження й розробки Харківської геоморфологічної школи / І. Г. Черваньов, С. В. Костріков, Б. Н. Воробйов / під ред. І. Г. Черваньова – Харків: Вид-во ХНУ, 2006. – 322 с.

19. *Bagnold R.* Bedload transport by natural rivers / Bagnold R. // Water Resource Research. – 1977. – Vol. 13. – P. 303-312.

20. *Костріков С. В.* Морфологія рельєфу як керуюча ланка гідролого-геоморфологічного процесу на водозборі / С. В. Костріков, І. Г. Черваньов // Фізична географія та геоморфологія: міжвідомчий науковий збірник. – Київ, 2009. – Вип. 56. – С. 67-74.

Надійшла до редколегії 24.03.2011